بررسی اثر عمق شیار V شکل بر چقرمگی شکست K_{IC} و ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک با استفاده از داده‌های آزمایش ضربهٔ شارپی در فولاد API X65*

مقاله علمی – پژوهشی

علی حسین زاده[۱]		خلیل فرهنگ دوست[۲]		محمدرضا مرکی[۳]

چکیده در این مقاله بررسی اثر عمق شیار بر چقرمگی شکست (K_{IC}) و ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک با استفاده از داده‌های آزمایش ضربهٔ شارپی (CVN) استخراج‌شده از لوله‌های انتقال نفت و گاز فولادی از جنس API X65 با عمق شیارهای متفاوت انجام و انرژی شکست اندازه‌گیری شد. همچنین شبیه‌سازی کامپیوتری آزمایش ضربه با مدل سه‌بعدی بر اساس قانون آسیب اصلاح‌شده گرسون در نرم‌افزار آباکوس انجام شد. برای به دست آوردن مقادیر K_{IC}، معادلات بر اساس تنش تسلیم و انرژی شکست‌های آزمایش ضربهٔ شارپی (CVN) به‌دست‌آمده از فولاد موردنظر استفاده شد. داده‌های K_{IC} و ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک برآورد شده با افزایش عمق شیار نمونه ضربهٔ شارپی کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی چقرمگی شکست، ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک، آزمایش ضربهٔ شارپی، اثر عمق شیار، فولاد API X65.

Effect of V-notch Depth on Fracture Toughness and the Plastic Region of the Crack Tip Using Charpy Impact Test Data in API X65 Steel

A. Hosseinzadeh		Kh. Farhangdoost		M. R. Maraki

Abstract *In this paper, the effect of notch depth on the fracture toughness (K_{IC}) and the plastic region of the crack tip material using the Charpy V-Notch test (CVN) data extracted from API X65 with different notch depth were conducted and the fracture energy was measured. Also, computer simulation of the experiment with a three-dimensional model was performed based on Gurson's modified damage law in Abaqus software. To obtain K_{IC} values, equations based on the yield stress (σ_{YS}) and the failure energy of the Charpy V-Notch test (CVN) obtained from the steel was used. The estimated K_{IC} data and plastic region of the crack tip, decreased with increasing notch depth.*

Key Words Fracture toughness, Crack tip plastic region, charpy impact test, notch depth effect, API X65 steel.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۹/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/٤/۷ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسندهٔ مسئول: استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۳) مربی، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند.

Email: rfarhang@um.ac.ir

DOI: 10.22067/fum-mech.v31i2.84506

مقدّمه

بخش عمده‌ای از خطوط لولهٔ فولادی به‌کاررفته در ایران از جنس فولاد API X65 است و در حال حاضر لوله‌هایی قطور با قطر خارجی ۵۶ اینچ از این فولاد ساخته می‌شوند. لذا ضروری است تا در مورد این نوع لوله اطّلاعاتی نظیر خواص مکانیکی (چقرمگی شکست، انرژی شکست، استحکام تسلیم، استحکام کششی)، ریزساختار، ترکیب شیمیایی و اطّلاعاتی از این قبیل جمع‌آوری و بررسی گردد [۱].

چقرمگی شکست کرنش صفحه‌ای ماده (K_{IC}) مستقل از ضخامت قطعه است. ولی برای ضخامت‌های کم که شرایط تنش صفحه‌ای برقرار است، ممکن است مقاومت ماده با رشد ترک افزایش یابد و قبل از شکست ناگهانی ماده، محدوده‌ای از رشد ترک نرم ایجاد شود. در چنین شرایطی آزمایش‌های مورداستفاده برای اندازه‌گیری چقرمگی تنش صفحه‌ای (K_C) به‌سختی قابل تفسیر است، به‌ویژه این‌که K_C تابعی از دمای محیط، نرخ کرنش و ضخامت قطعه است. لیکن K_{IC} فقط تابع دمای محیط و نرخ کرنش است. با توجّه به اینکه بیشتر قطعاتی که در سازه‌های مهندسی به کار می‌روند، معمولاً به شکلی هستند که شرایط تنش صفحه‌ای بر آن‌ها حاکم است، لازم است چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای موردتوجّه بیشتری قرار گیرد [۲].

در مکانیک شکست الاستیک خطی، K_{IC} مقدار شدّت تنش در نوک ترک است اگر کرنش در جسم الاستیک باشد [3]. در حال حاضر، استاندارد ASTM E-399 برای به دست آوردن مقادیر K_{IC} در کرنش صفحه‌ای برای حالت جابجایی باز شدن ترک استفاده می‌شود. این استاندارد پیچیده و پرهزینه است؛ زیرا شامل نمونه‌های آزمایش ماشین‌کاری با هندسهٔ پیچیده تحت تلورانس‌های بسیار سخت است. علاوه بر این، همیشه نمی‌توان نمونه را ساخت، اگر مواد آنالیز شده ابعاد مناسب نداشته باشد [4]. بااین‌وجود، می‌توان مقادیر K_{IC} را از رابطهٔ بین K_{IC} و آزمایش ضربهٔ شارپی [5-17] به دست آورد. این رابطه‌ها بر اساس نمونه CVN است. مقدار K_{IC} یک خواص ماده است که مستقل از هندسهٔ کرنش صفحه‌ای است؛ بنابراین، مقدار K_{IC} می‌تواند به ساختار یا عنصر ساخته‌شده از همان ماده اعمال شود [18].

در این مقاله، مقادیر K_{IC} از روابط بین K_{IC} و انرژی ضربهٔ شارپی در مطالعات انجام‌شده برای داده‌های آزمون ضربه CVN گزارش‌شده است. مقادیر CVN از کار گزارش‌شده توسط حسین‌زاده [۳۵ و ۱] به دست آمد. نمونه آزمون شارپی با ابعاد استاندارد (۱۰×۱۰×۵۵ میلی‌متر) و شیار (شعاع قوس شیار ۰/۲۵ میلی‌متر، زاویه ۴۵ درجه و عمق شیار از ۱/۲۵ تا ۳ میلی‌متر) در فلز پایه فولاد API X65 استخراج شد. در این مقاله به تأثیر عمق شیار بر ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک و چقرمگی شکست بر اساس نتایج تجربی و عددی برای فولاد API X65 پرداخته‌شده است.

معرفی ماده

استاندارد API مشخصات فولادهای پراستحکام مانند ترکیب شیمیایی، استحکام تسلیم، استحکام شکست، شرایط جوشکاری، فرایندهای ساخت، نحوهٔ انجام آزمایش‌های مکانیکی و مواردی ازاین‌دست را بیان می‌کند. تمامی این فولادها با گریدهایی توسط یک حرف و یک عدد مشخص می‌شوند که این عدد (به‌جز گریدهای A و B) حداقل استحکام تسلیم این نوع فولادها را بر اساس واحد انگلیسی (ksi) مشخص می‌کند. بر اساس استاندارد API این گریدها عبارت‌اند از: A25، B، X42، X46، X52، X56، X60، X65، X70، X80 و X100. محصولات API در دو سطح PSL1 و PSL2 که بیانگر دو سطح مختلف استاندارد تخصصی

موردنیاز این محصولات هستند، بیان می‌شوند [۱۹].

به‌طورکلّی لولهٔ سیاه فولادی در صنعت به دو دسته درزدار و بدون درز تقسیم می‌شود. لوله‌های درزدار برای انتقال مایعات، تولید پروفیل‌های قوطی، ساخت مصنوعات و سازه‌های فلزی به‌کاربرده می‌شود [۲۰].

خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی فولاد آزمایش‌شده به ترتیب در جدول (۱) و (۲) ذکرشده است.

جدول (۱): خواص مکانیکی فولاد API X65 [21]

مقدار	خواص مکانیکی
۲۱۰	Young's modulus (GPa)
۵۰۵	Yield strength (MPa)
۶۱۱	Tensile strength (MPa)
۰/۸۳	Yield to UTS
۲۰	Elongation (%)
۸۵۰	K(GPa)
۰/۰۹۸	n
۲۱۷–۲۲۸	Vickers Hardness (HV)

جدول (۲): ترکیب شیمیایی لولهٔ فولادی API X65 [21]

C	P	Mn	S	Si	Cr	Fe
۰/۰۷۲	۰/۰۰۸	۱/٤٥	۰/۰۰۲	۰/۲۰۱	۰/۳۲۰	Balance

آزمایش تجربی

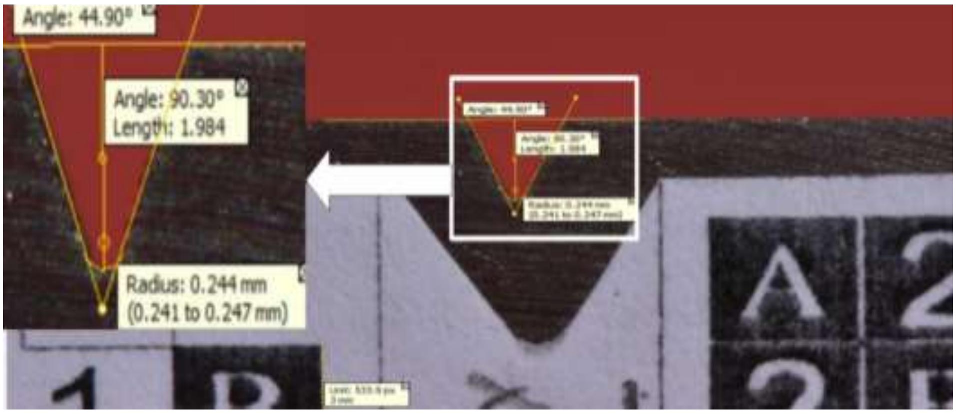
به‌منظور دست‌یابی به اهداف پژوهش، ۲٤ نمونه ضربهٔ شارپی در ۸ گروه ۳ تایی از لوله ساخته‌شده در مقیاس صنعتی با جنس فولاد میکرو آلیاژی گرید API X65 با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت دیوارهٔ ۱٤/۳ میلی‌متر جداشده است.

پس از برش اولیهٔ نمونه‌ها به‌منظور رساندن آنها به ابعاد استاندارد، می‌بایست بر روی آنها عملیات برشکاری و تراشکاری صورت پذیرد. با استفاده از دستگاه برش‌زن لوله، لولهٔ فولادی برش خورده صفحه‌ای از آن جداشده که این صفحه در قسمت فلز پایه می‌باشد. با توجّه به اینکه نمونه‌ها از لوله‌ای به قطر ۱۲۱۹ میلی‌متر بریده می‌شوند، پس از برش دارای انحنا خواهند بود که توسط دستگاه فرز، ضخامت آن به ۱۰ میلی‌متر و هم‌چنین عرض ستون به ۵۵ میلی‌متر (اندازهٔ استاندارد طول نمونه‌های آزمایش ضربهٔ شارپی) کاهش یافت. سپس توسط دستگاه سنگ‌زنی سطح آن صاف و صیقلی شد.

در این تحقیق با استفاده از دستگاه وایرکات نمونه‌ها با ابعاد استاندارد ۵۵×۱۰×۱۰ میلی‌متر و شیار آن با زاویهٔ ٤٥ درجه و قوس انتهای شیار با شعاع ۰/۲۵ میلی‌متر و عمق شیار از ۱/۲۵ تا ۳ میلی‌متر (۸ نمونه با اختلاف ۰/۲۵ میلی‌متر) با اعمال دقّت کافی و رعایت الزامات استاندارد ساخته شد.

برای صحّت سنجی ابعاد نمونه‌ها (ضخامت، طول و عرض) با میکرومتر اندازه‌گیری شد. ابعاد شیار نمونه‌ها (عمق و شعاع قوس) با دوربین عکس‌برداری با عدسی ماکرو و نرم‌افزار پردازش تصویر با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر مطابق شکل (۱) به‌طور دقیق اندازه‌گیری شد که کاملاً مطابق تلورانس‌های استاندارد ASTM E23 بود و سپس به آزمایشگاه کنترل کیفیت (کارخانه لوله‌سازی اهواز) برای انجام آزمایش ضربه منتقل شد.

آزمایش ضربهٔ شارپی با استفاده از ماشین زوئیک رول آلمان با ظرفیت ۷۵۰ ژول که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، در دمای ۲۰ درجهٔ سلسیوس (دمای محیط شهر اهواز در آذرماه) انجام شد. آزمایش ضربهٔ شارپی برای نمونه‌های فلز پایه ۳ بار تکرار شده و میانگین انرژی شکست به‌دست‌آمده است.



شکل (۱): اندازه‌گیری با نرم‌افزار دیجیمایزر [۳۵]



شکل (۲): ماشین ضربهٔ شارپی زوئیک رول آلمان

در این آزمایش سه نمونه با ابعاد استاندارد و بیست‌ویک نمونه با عمق شیار V شکل غیراستاندارد تحت آزمایش ضربهٔ شارپی قرار گرفت. مشخصات اصلی ماشین ضربهٔ شارپی زوئیک رول آزمایش‌شده در جدول (۳) نشان داده‌شده است.

جدول (۳): مشخصات اصلی ماشین ضربهٔ شارپی

ظرفیت (J)	شعاع ضربه‌زن (mm)	سرعت ضربه‌زن (m/s)	جرم ضربه‌زن (kg)
۷۵۰	۸	۵/٤۲	۵۰

این دستگاه مجهز به سیستم نمایش انرژی بوده و به صورت دیجیتال انرژی شکست نمونه را می‌توان از روی صفحهٔ مانیتور آن قرائت کرد.

طی این مرحله، با توجّه به مقادیر انرژی شکست به‌دست‌آمده، انرژی شکست میانگین سه نمونه استاندارد ۲٤۱ ژول است که این انرژی معادل ۳۲ درصد ظرفیت دستگاه آزمایش این شرکت بوده است. ازآنجاکه مطابق استاندارد، حداکثر انرژی شکست نمونه‌ها می‌بایست از ۸۰٪ ظرفیت ماشین کمتر باشد، این آزمایش ازنظر

استاندارد قابل‌قبول است [22]. در شکل (۳) یک گروه سه‌تایی از نمونه آزمایش شارپی قبل و بعد شکست مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه‌ها به‌صورت کامل شکسته نشده و شکست نرم اتفاق افتاده است.

نتایج و بحث

به دلیل دشوار بودن، پرهزینه و وقت‌گیر بودن آزمایش چقرمگی شکست، تلاش می‌شود از روش‌های ساده‌تر مانند آزمایش ضربهٔ شارپی جهت محاسبه K_{IC} استفاده گردد. از سال ۱۹۷۰ محقّقانی نظیر Rolfe، Novak و سایرین با انجام آزمایش‌های متعدّد به وجود روابطی بین چقرمگی شکست و انرژی شکست آزمایش ضربهٔ شارپی (با استفاده از نمونه با شیار V شکل) پی بردند. در جدول (٤) تعدادی از روابط که برای لولهٔ فولادی API X65 کاربرد دارد آورده شده است [21].

در روابط جدول (٤)، K_{IC} چقرمگی شکست در حالت کرنش مسطح، σ_y تنش تسلیم و CVN انرژی شکست حاصل از آزمایش ضربهٔ شارپی روی نمونه شیاردار با شیار V شکل است و واحد این کمیت‌ها به ترتیب $MPa\sqrt{m}$، MPa و J است.

با استفاده از روابط جدول و انرژی شکست به‌دست‌آمده از آزمایش ضربهٔ شارپی و هم‌چنین با داشتن $\sigma_{YS} = 505MPa$ ابتدا K_{IC} در ۸ حالت به دست آورده و سپس با توجّه به محقّقان دیگر که برای نمونهٔ استاندارد K_{IC} را برای این فولاد به دست آوردند مقایسه می‌شود و ۲ رابطه که تطابق خوبی دارند برگزیده می‌شود. سپس با استفاده از روابط فون میزز ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک و شبیه‌سازی نمونه استاندارد مقایسه می‌شود و بهترین تطابق به‌عنوان رابطهٔ مدنظر انتخاب می‌شود و در پایان به مقایسهٔ اثر عمق شیار در ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک و K_{IC} برای فولاد آزمایش‌شده پرداخته می‌شود.



شکل (۳): یک گروه سه‌تایی (با عمق شیار استاندارد) از نمونهٔ آزمایش شارپی قبل و بعد شکست [۳۵]

جدول (٤): روابط بین K_{IC} و انرژی ضربهٔ شارپی

ردیف	مرجع	رابطه
1	Rolfe-Novak-Barsom [23,24]	$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{YS}}\right)^2 = 0.64(\frac{CVN}{\sigma_{YS}} - 0.01)$
2	[25] Ault et al.	$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{YS}}\right)^2 = 1.37(\frac{CVN}{\sigma_{YS}} - 0.045)$
3	Van der Sluys et al. [26] and Witt [27]	$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{YS}}\right)^2 = 0.893(\frac{CVN}{\sigma_{YS}} - 0.0291)$
4	Kussmaul and Roos [28]	$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{YS}}\right)^2 = 1.23(\frac{CVN}{\sigma_{YS}} - 0.0061)$
5	WRC 265 [10]	$K_{IC} = 8.47(CVN)^{0.63}$
6	Sailors and Corten [11]	$K_{IC} = 14.6(CVN)^{0.50}$
7	Marandet and Sanz [15]	$K_{IC} = 19(CVN)^{1/2}$
8	Robert and Newton [13]	$K_{IC} = 8.47(CVN)^{0.63}$

در عمل برای به دست آوردن چقرمگی شکست از دو روش متداول آزمون خمش سه‌نقطه‌ای و CT استفاده می‌شود. بدین منظور نمونه‌هایی با ابعاد استاندارد از مادهٔ موردنظر استخراج و آزمایش می‌شود. حاصل این آزمایش نمودار نیروی وارد بر نمونه‌ها برحسب گشودگی دهانهٔ ترک خواهد بود. سپس از نمودار به‌دست‌آمده مقدار گشودگی نوک ترک را به دست آورده و با توجّه به رابطهٔ بین چقرمگی شکست و گشودگی نوک ترک که در استاندارد آورده شده است، مقدار چقرمگی شکست را به دست می‌آورند [32]. برای فولاد آزمایش‌شده هاشمی و همکار [21,۳۰] با استفاده از آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای و شبیه‌سازی CT بر روی ۱۰۰ نمونه چقرمگی شکست بین ۲۸۳ تا ۳۳٤ $MPa\sqrt{m}$ به دست آوردند. اصغری و همکاران [۳۰] با استفاده از آزمایش CT مقدار K_{IC} را برای این فولاد ۳۰٤ $MPa\sqrt{m}$ گزارش کردند. بیک و همکاران [31] برای این فولاد مقدار K_{IC} را ۳۰۸ $MPa\sqrt{m}$ گزارش کردند. با داشتن مقادیر K_{IC} گزارش‌شده [21,29-31] و همچنین مقادیر K_{IC} به‌دست‌آمده برای نمونه استاندارد ضربهٔ شارپی با استفاده از روابط جدول (٤)، در جدول (٥) گزارش‌شده است.

از روابط جداول (٤) و (٥)، دو رابطه بر اساس تحقیقات انجام‌شده موردقبول است. برای به دست آوردن رابطهٔ قطعی که بتوان برای این فولاد به آن استناد کرد با توجّه به رابطهٔ فون میزز ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک را برای نمونه استاندارد ضربهٔ شارپی به دست آورده و سپس با ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک که در شبیه‌سازی به‌دست‌آمده مقایسه می‌شود.

اندازهٔ ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک بر اساس رابطهٔ فون میزز به‌صورت رابطهٔ (۱) [33] است:

$$r = \frac{1}{4\pi}\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{YS}}\right)^2 [\frac{3}{2}\sin^2\theta + h(1+\cos\theta)] \qquad (۱)$$

در رابطهٔ (۱)، r اندازهٔ ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک، KIC چقرمگی شکست، σ_{YS} تنش تسلیم و h برای حالت تنش صفحه‌ای h=1 یا کرنش صفحه‌ای h=(1-2ν)2 است. برای نمونه‌های ضربهٔ شارپی حالت کرنش صفحه‌ای است، بنابراین برای نمونه‌های آزمایش ضربهٔ شارپی ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک بر اساس رابطهٔ فون میزز به‌صورت رابطهٔ (۲) است:

$$r = \frac{1}{4\pi}\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{YS}}\right)^2 \left[\frac{3}{2}\sin^2\theta + (1-2\vartheta)^2(1+\cos\theta)\right]$$
(۲)

با داشـــتن مقادیر $\nu = 0.3$، $\sigma_{YS} = 505\ GPa$ و K_{IC} های مورد تائید در جدول (۵) می‌توان نمودار ناحیهٔ پلاســتیک نوک ترک را با رابطهٔ (۲) برای نمونه استاندارد آزمایش ضربهٔ شارپی ترسیم کرد. سه رابطهٔ مختلف با توجّه به داشتن سه K_{IC} در جدول (٦) شرح داده‌شده است.

شکل (٤) ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک بر اساس روابط فون میزز به‌صورت کرنش صفحه‌ای و تنش صفحه‌ای به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد [33].

شبیه‌سازی نمونه‌های آزمایش ضربهٔ شارپی به‌صورت سه‌بعدی و تغییر شکل‌پذیر و بر اساس مدل اصلاح گرسون انجام شد [۳۵] و مراحل مختلف شکست شبیه‌سازی نمونه استاندارد در شکل (۵) مشاهده می‌شود. در این تحقیق قسمت مدنظر در لحظه شروع ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک ایجاد می‌شود، است.

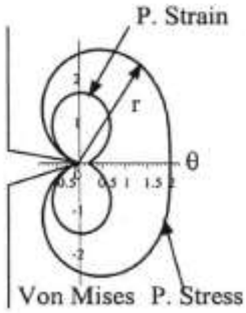
با اســـتفاده از روابط جدول (٦) نمودار ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک برای نمونه استاندارد مطابق شکل (٦) است.

جدول (۵): K_{IC} های نمونه استاندارد آزمایش شارپی

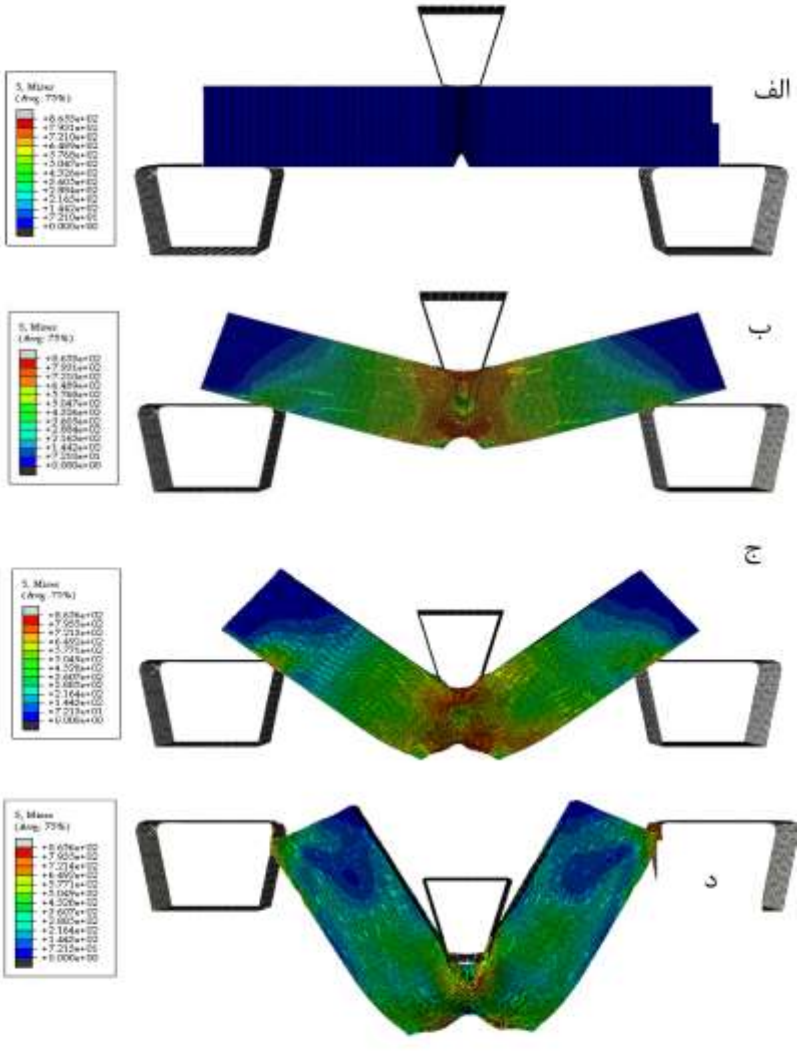
ردیف	مرجع	K_{IC} $MPa\sqrt{m}$	توضیحات
1	Rolfe-Novak-Barsom [23,24]	۲۷٦/٤۷۹۸	عدم تطابق با آزمایش تجربی و شبیه‌سازی مراجع [21,29-31]
2	[25] Ault et al.	۳۸۹/۱۰۹۷	
3	Van der Sluys et al. [26] and Witt [27]	۳۱۹/۸۵۸۵	مطابق آزمایش تجربی و شبیه‌سازی مراجع [21,29-31] است
4	Kussmaul and Roos [28]	۳۸٤/۸۸۱۳	عدم تطابق با آزمایش تجربی و شبیه‌سازی مراجع [21,29-31]
5	WRC 265 [10]	۲٦۸/٦۵۳۸	
6	Sailors and Corten [11]	۲۲٦/۹۱۷۷	
7	Marandet and Sanz [15]	۲۹۵/۳۰۳۸	مطابق آزمایش تجربی و شبیه‌سازی مراجع [21,29-31] است
8	Robert and Newton [13]	۲٦۸/٦۵۳۸	عدم تطابق با آزمایش تجربی و شبیه‌سازی مراجع [21,29-31]

جدول (٦): معادلات ناحیهٔ پلاستیک نمونه استاندارد شارپی

ردیف	K_{IC} $(MPa\sqrt{m})$	رابطهٔ ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک نمونه استاندارد آزمایش ضربهٔ شارپی
۱	۳۱۹/۸۵۸۵	$r_1 = 0.03192(1.5\sin^2\theta + 0.16(1+\cos\theta))$
۲	۲۹۵/۳۰۳۸	$r_2 = 0.02721(1.5\sin^2\theta + 0.16(1+\cos\theta))$



شکل (٤): شماتیک ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک برای تنش صفحه‌ای و کرنش صفحه‌ای در حالت کلّی [33]

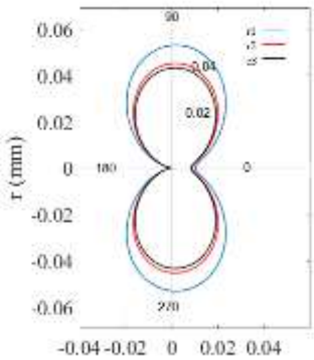


شکل (۵): مراحل شکست نمونه ضربهٔ شارپی در نرم‌افزار آباکوس؛ الف) تصویر نمونه قبل از شکست،
ب) تصویر نمونه در لحظه ۱/۵ میلی‌ثانیه، ج) تصویر نمونه در لحظه ۳ میلی‌ثانیه،
د) تصویر نمونه بعد از اتمام شکست [۳۵]

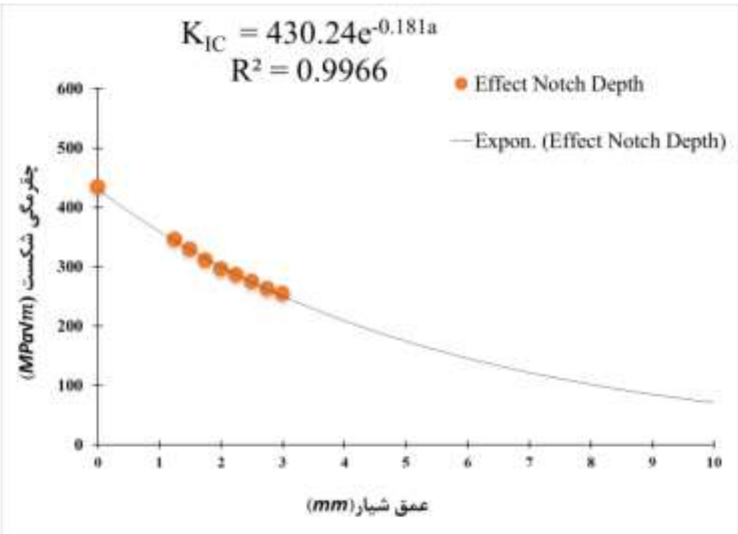
در شکل (٦)، r3 از نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق هاشمی [21,۳۰] و اصغری [29] است که با مقایسه نمودارها بهترین چقرمگی شکست را مقدار ۲۹۵/۳۰۳۸MPa$\sqrt{m}$ می‌توان گزارش کرد که این اختلاف بین ۳ تا ٤ درصدی با توجّه به شکل (۹) که نمودار دمایی فولاد ایکس شصت‌وپنج را نشان می‌دهد، به علّت اختلاف دما به‌عنوان یک عامل مؤثر در چقرمگی شکست است.

بنابراین برای به دست آوردن K_{IC} سایر نمونه‌ها که عمق شیار تغییر می‌کند از رابطهٔ مارندت و سنز [15] استفاده می‌شود. در شکل (۷) و (۸) به ترتیب اثر عمق شیار بر K_{IC} و اثر عمق شیار بر ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک در فولاد ایکس شصت‌وپنج را نشان می‌دهد.

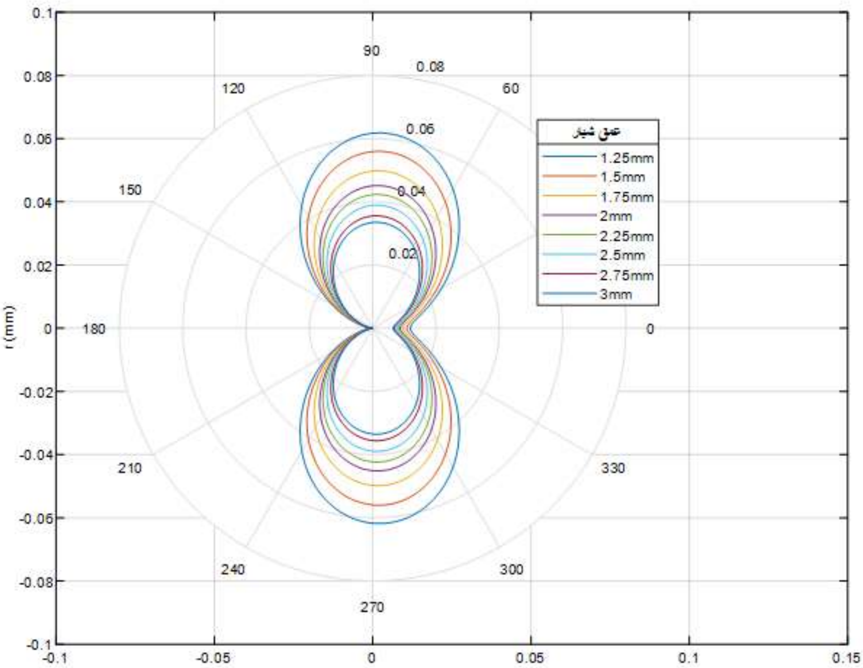
در نمودار شکل (۷) چقرمگی شکست که خاصیت ماده ا ست به‌عنوان تابعی از عمق شیار داده شده ا ست. مقاومت ماده در برابر شکست، تابع ضخامت نمونه است و وقتی ضخامت به‌اندازهٔ کافی زیاد شد، این وابستگی از بین می‌رود. به این مقدار ثابت، چقرمگی شکست گفته می‌شود.



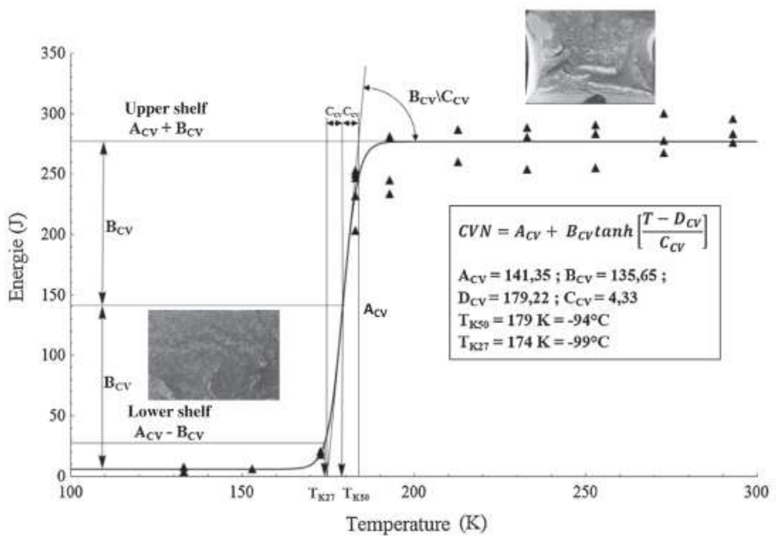
شکل (٦): ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک نمونه استاندارد شارپی



شکل (۷): نمودار اثر عمق شیار نمونه شارپی بر K_{IC}



شکل (۸): نواحی پلاستیک نوک ترک نمونه‌های شارپی با تغییر عمق شیار



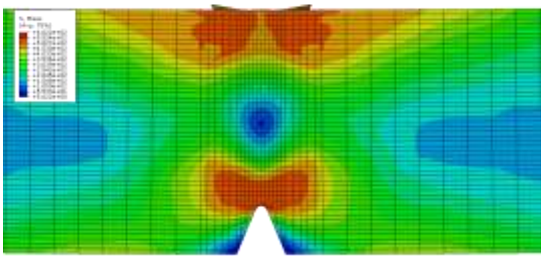
شکل (۹): نمودار انرژی-دما برای فولاد API X65 [34]

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود با افزایش عمق شیار چقرمگی شکست طبق رابطه نمایی کاهش می‌یابد که این کاهش به علّت کم‌شدن سطح مقطع است. در شکل (۸) مشاهده می‌شود که با افزایش عمق شیار ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک کاهش می‌یابد.

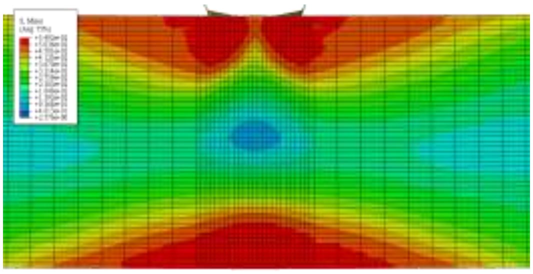
در شکل (۱۰) و (۱۱) ناحیهٔ پلا ستیک نوک ترک در نمونهٔ با شیار و بدون شیار از شبیه سازی م شاهده می‌شود.

همان‌طور که از مقایسهٔ نمودار شیاردار و بدون شیار م شخص ا ست، ناحیهٔ پلا ستیک در نمونهٔ بدون

شیار بسیار بیشتر از نمونهٔ شیاردار است و مانند شکل (٦) که برای نمونه‌های ترک‌دار است تبعیت نمی‌کند.



شکل (١٠): ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک نمونه استاندارد شارپی



شکل (١١): ناحیهٔ پلاستیک نمونه شارپی بدون شیار

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر بررسی اثر عمق شیار V شکل بر چقرمگی شکست و ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک با استفاده از داده‌های آزمایش ضربهٔ شارپی در فولاد ایکس شصت‌وپنج بررسی شد. برای این تحقیق بیست‌وچهار نمونه در هفت سری نمونه (هر نمونه با ٣ بار تکرار) با عمق شیار غیراستاندارد و یک سری ٣ تایی نمونه با ابعاد استاندارد مورد آزمایش قرار گرفت. دستگاه ضربهٔ شارپی مورداستفاده در این آزمایش با ظرفیت ٧٥٠ ژول مطابق استاندارد ASTM E23 انتخاب شد. همچنین شبیه‌سازی سه‌بعدی نمونه در نرم‌افزار آباکوس صورت گرفت. خلاصهٔ نتایج به‌دست‌آمده عبارت است از:

١. با افزایش عمق شیار انرژی شکست شارپی به صورت نمایی بر اساس رابطهٔ $E = 503.44e^{-0.352a}$ کاهش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش عمق شیار، چقرمگی شکست به صورت نمایی بر اساس رابطهٔ $K_{IC} = 430.24e^{-0.181a}$ کاهش پیدا می‌کند.

٢. ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک با استفاده از رابطهٔ فون میزز و چقرمگی شکست به‌دست‌آمده از رابطهٔ ماندرات و سنز به دست آمد و مشاهده شد که با افزایش عمق شیار، ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک کاهش می‌یابد.

٣. برای اعتبارسنجی نتایج چقرمگی شکست به‌دست‌آمده از آزمایش تجربی ضربهٔ شارپی تحقیقات هاشمی و اصغری استفاده شد. مقایسه مقدار حاصل از نتایج آزمایش تجربی و تحقیقات هاشمی و اصغری طبق رابطهٔ ماراندت و سنز ٣ تا ٤ درصد خطا دارد که به علّت اختلاف دمای محیط آزمایش است.

٤. برای اعتبارسنجی ناحیهٔ پلاستیک به‌دست‌آمده از آزمایش تجربی ضربهٔ شارپی از شبیه‌سازی سه‌بعدی بر اساس مدل اصلاح‌شده آسیب گرسون استفاده شد. مقایسهٔ ناحیهٔ پلاستیک به‌دست‌آمده از معیار فون میزز و رابطهٔ ماراندت و سنز با شبیه‌سازی تطابق خوبی داشت.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از دانشگاه بیرجند که داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی در این دانشگاه انجام‌شده است و همچنین راهنمایی دکتر سیّدحجّت هاشمی اعلام می‌دارند. همچنین از آقایان مهندس غریب‌زاده (مدیر پژوهش و توسعه)، مهندس احمدی، مهندس داودیان رنجبر، مهندس کلانتری و مهندس سلطانی در آزمایشگاه کنترل کیفیت شرکت لوله‌سازی اهواز کمال تقدیر و تشکر رادارند. همچنین از شرکت لوله و تجهیزات سدید به لحاظ در اختیار قرار دادن فولاد API X65 و آقایان مهندس اسماعیل قاسمی سلوکلو و

مهندس محمّدعلی آبادزردشتی که در شبیه‌سازی یاری نمودند قدردانی و تشکر می‌گردد.

واژه‌نامه

آزمایش خمش سه‌نقطه	3D Pointing Test
آزمایش ضربهٔ شارپی	Charpy Impact Test
تنش ترسکا	Tresca Stress
تنش فن میزز	Von Mises Stress
چقرمگی شکست	Fracture toughness
شبیه‌سازی	Simulation
عمق شیار	Notch Depth
فولاد	Steel
قطبی	Polar
مکانیک شکست	Fracture Mechanic
مکانیک ضربه	Impact Mechanic
ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک	Crack tip plastic region
نمونه	Specimen

مراجع

1. Hosseinzadeh, A., "Experimental and numerical investigation of section thickness effect on Charpy fracture energy in API X65 steel", MSC thesis of Mechanical Engineering, University of Birjand, (2018).
2. Majzoobi, Gh., Alavinia, A., "Strength of Materials 3", Bu Ali Sina University Press, (2011).
3. Velazquez, J. L.," Mecánica de fractura", México: Limusa, (2004).
4. Matusevich, A. E., Mancini, R. A., Giudici, A. J., "Determinación de la tenacidad a la fractura del material de un gasoducto", *Revista Latinoamericana Am Metal Mater*;Vol.32, No. 2, pp. 60-253, (2012).
5. McNicol, R. C., "Correlations of Charpy test results for standard and nonstandard size specimens", *Shaker Heights: Welding Research Council*; Vol. 5. pp. 385, (1965).
6. Phaal, R., Macdonald, K. A,, Brown, P. A., "Correlations between fracture and Charpy impact energy", report from the cooperative research programmed for industrial members only, TWI report 504/1994. Cambridge, U.K.: The Welding Institute, (1994).
7. Barsom, J. M., Rolfe, S. T., "Fracture and fatigue control in structures", 3rd ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, (1999).
8. Rolfe, S. T., Novak, S. R., "Slow-bend KIC testing of medium high-toughness steel", Review of development in plane strain fracture toughness testing, ASTM STP 463, ASTM; pp. 124–59, (1970).
9. Barsom, J. M., Rolfe, S. T., "Correlations between KIC and Charpy V-notch test results in the transition-temperature range", Impact Testing of Metals, ASTM STP 466, ASTM;. pp. 281–302, (1970).
10. Roberts, R., Newton, C., "Interpretive report on small scale test correlations with KIC data", WRC Bulletin, Welding Research Council, New York N.Y;.February,. pp. 265, (1981).

11. Sailors, R. H., Corten, H. T., "Relations between material fracture toughness using fractures mechanics and transition temperature test", In: Fracture toughness, proceeding of the 1972, National Symposium on Fracture Mechanics – Part II, STP 514, ASTM; pp. 164–91, (1972).
12. Wullaert, R. A., "Fracture toughness predictions from Charpy V-notch data, what does the Charpy test really tell us In: Proceeding of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers", American Society for Metals, (1978).
13. Roberts, R., Newton, C., "Report on small-scale test correlations with KIC data", Weld Res Council Bull;299, (1984).
14. Barsom, J. M., "The development of AASHTO fracture toughness for bridge steel", *Engineering Fracture Mechanics*; Vol. 7, No. 3, pp. 605–18, (1975).
15. Marandet, B., Sanz, G., "Evaluation of the toughness of the medium-strength by using elastic fracture mechanics and correlations between KIC and Charpy V-notch", *Flaw Growth and Fracture*, STP 631, ASTM;. pp. 72–95, (1977).
16. Norris, D. M., Reaugh, J. E., Server, W. L., "A fracture-toughness correlations based on Charpy initiation energy", Fracture Mechanics: Thirteenth Conference, STP 473, ASTM; pp. 207–17.
17. Walling, K., "New report methodology for selecting Charpy toughness criteria for thin high strength steels. Report Represented to Commission X", Annual assembly, Beijing, IIW DOC. NO. X.1290-94, (1981).
18. Morales, F. R., Scott, A. D., Nápoles, N. P., "Determinación de la tenacidad a la fractura de muestras de acero 45 fundido, empleando las correlaciones entre el KIC y la energía de impacto medida en el ensaye de Charpy", Ingeniería Mecánica;2:29–33, (2005).
19. Salaripour, H., "Analysis of experimental results of API X70 steel drop weight tear test", Master Thesis in Mechanics, Department of Mechanics, Birjand University, (2011).
20. Verlinden, B., "Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials", First Edition, *Elsevier* Ltd, (2007).
21. Hasemi, S. H., Kymyabakhsh, M., Rezaei Yekta, M., Farahi, A., "Experimental and numerical investigation of the influence of the length of the three-point bending point groove on the value of the integral J in steel gas transfer pipes with API X65", *19th Aannual Conference of Iranian Society of Mechanical Engineering (ISME2011)*, Birjand, University of Birjand, (2011).
22. ASTM E23, standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials (Approved Nov. 10. 2002, Published May 2003).
23. Rolfe, S. T., Novak, S. T., "Impact testin of metals", ASTM STP 463. American Society for Testing and Materials; pp. 124-159, (1970).
24. Barsom, J. M., Rolfe, S. T., "Impact testing of metals", ASTM STP 466. American Society for Testing

and Materials; pp. 281-302, (1970).

25. Ault, R. T., Wald, G. M., Bertola, R. B., "Development of an improved ultrahigh strength steel for forged aircraft components", AFML TR 71271, Airforce Materials Lab, Wright-Patterson Airforce Base, Ohio, USA, (1971).
26. VanderSluys, W. A., Seely, R. R., Schwabe, J. E., "Determining fracture properties of reactor vessel forging materials", EPRI NP 922, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, USA, pp. 5-22, (1983).
27. Witt, F. J., "Relationships between Charpy impact shelf energies and upper shelf K_{IC} values for reactor pressure vessel steels", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, (1983).
28. Kussmaul, K., Roos, E., "Statistical evaluation of post-yield fracture mechanics properties on the basis of the notched bar impact test", Safety and Reliability of Pressure Components with Special Emphasis on Fracture Exclusion: 10th MPA seminar, *Staatliche Material prufungsanstalt Universitat, Stuttgart*, Vol.1, pp. 12, (1984).
29. Asghari, V., ChoupaniNaghdalHanifi, M., "CVN–KJC correlation model for API X65 gas pipeline", *Engineering Failure Analysis*, doi: 10.1016/j.engfailanal.2017.04.007, (2017).
30. Hasemi, S. H., Kymyabakhsh, M., "Experimental and Numerical Determination of Fracture Toughness in Gas Pipeline Steel of Grade API X65", *Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering),* Vol. 45, No. 2, (2013)
31. Beak, J. H., Kim, Y. P., Kim, C. M., Kim, W. S., Seok, C. S., "Effect of Pre-Strain on the Mechanical Properties of API X65 Pipe", *Material and Science A*, Vol. 527, pp.1473-1479, (2010).
32. BS EN ISO 12737, "Metallic Materials Determination of Plan-Strain Fracture Toughness", British Standard 000Institution, (1999).
33. Perez, N., "Fracture Mechanics", Department of Mechanical Engineering, University of Puerto Rico, (2004).
34. Capelle, J., Furtado, J., Azari, Z., Jallais, S., Pluvinage, G., "Design based on ductile–brittle transition temperature for API 5L X65 steel used for dense CO2 transport", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 110, pp. 270-280, ISSN 0013-7944, (2013).
35. Hosseinzadeh, A., Hashemi, S. H., "Experimental and numerical investigation of notch depth effect on Charpy fracture energy in API X65 steel", *Iranian Journal of Science and Technology*, (2020).